

OpenCAE勉強会@富山
2014/12/13

Salome-meca他熱伝導解析機能調査

OpenCAE勉強会

SH

本日の発表内容

- **熱伝導解析手法について**
- **オープンソースCAE熱伝導解析**
- **Salome-mecaによる熱伝導解析機能の概要**
- **非線形熱伝導解析機能検証**
- **直交異方性熱伝導解析機能検証**
- **まとめ**

熱伝導解析手法について

- 熱伝導解析を解く方法には次のような方法がある、純粹に固体内の熱伝導解析は構造解析分野だと思いが、熱伝達が接触する流体(空気・水等)の流れ大きく影響されるので、CFDソフトも固体内の熱伝導を合わせて解く機能をもつものも多く、厳密に流体との熱移動も考えて熱設計を行う場合はCFDソフトで計算することが多い。

解析手法	原理・特徴など
熱抵抗回路網法	熱伝導のパスを仮定し、途中経路の熱伝導体を全て集中熱抵抗に置き換えて各部の温度を求める。計算は速い。設計上流や簡単な熱パスが想定できる系で主に利用される
差分法	熱伝導微分方程式を直接差分近似して温度を求める。数値計算のテキストによくのっているが、あまり熱伝導解析向けの実用的ソフトに実装されているものは見たことがあまりない
有限体積法	熱流体解析ソフトに使用される代表的手法で熱流体と固体の熱連成を計算する場合に主に用いられる。OpenFOAMではCHTマルチリージョンソルバとして実装されている
有限要素法	構造解析ソフトに使用される代表的手法で固体熱伝導のみを計算する場合に主に用いられる

オープンソースCAE熱伝導解析

オープンソース名称	計算コマンド	計算手法	解析機能	備考
OpenFOAM	laplacianFoam	有限体積法	固体の非定常熱伝導解析	単一材のみ・拡張可能
	ChtmultiResionSimpleFoam		マルチリージョン定常熱流体・熱伝導解析	流体は圧縮性ソルバ・固体だけの計算も可能
	ChtmultiResionFoam		マルチリージョン非定常熱流体・熱伝導解析	流体は圧縮性ソルバ・固体だけの計算も可能
	solidDisplacementFoam		非定常熱伝導・熱応力解析	
	solidEquilibriumDisplacementFoam		定常熱伝導・熱応力解析	
CodeAster(Salome-meca)	Ther	有限要素法	線形熱伝導解析	
	Ther_Orth		線形直交異方性	
	Ther_NL		非線形熱伝導	異方性は不可
Calculix	HEAT TRANSFER	有限要素法	定常・非定常解析	定常・非定常解析が可能
	*TYPE=ISO		等方性	線形・非線形(温度依存)
	*TYPE=ORTHO		直交異方性	線形・非線形(温度依存)
	*TYPE=ANISO		異方性	$\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}, \lambda_{12}, \lambda_{23}, \lambda_{31}$ を指定
Elmer	Heat Solver	有限要素法	線形熱伝導解析	詳細機能未確認
FrontISTR	!SOLUTION, TYPE=HEAT !HEAT	有限要素法	線形熱伝導解析	詳細機能未確認

Salome-mecaによる熱伝導解析

・どのような問題か、線形・非線形 定常・非定常 (EDF 社 資料から)

What is the problem to be solved?

AFFE_MODELE (... PHENOMENE = 'THERMIQUE' ...)

Heat equation :

$$\rho C \dot{T} - \lambda \Delta T - s = 0$$

Linear (THER_LINEAIRE)

OR

Non-linear (THER_NON_LINE)

If : Material parameters depend on T
AND/OR

Non linear boundary conditions (flux(T))

Temperature dependence?

AND

Stationnary

OR

Transient

Time dependence?

Salome-mecaによる熱伝導解析

・Salome-mecaでの熱伝導解析はWizardでは単純な等方向性線形熱伝導解析しかできない。境界条件も境界温度指定など単純なものしかできないが、CodeAster自体はそこそこ難しい条件で解析が可能である(EDF社 資料から抜粋)

Material behavior

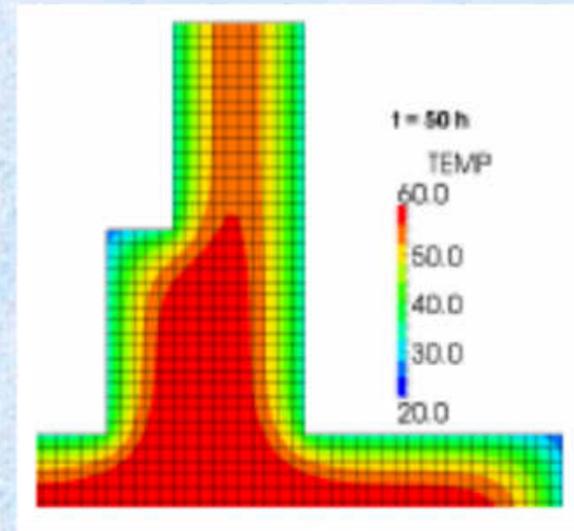
DEFI_MATERIAU

At least these two characteristics:

Thermal conductivity	λ
Heat capacity	ρC_p

3 main materials :

ThER	Linear isotropic
ThER_ORTH	Linear orthotropic (definition of λ in 3 directions)
ThER_NL	Non-linear behaviour : one has to define $\rho C_p(T)$ or $\beta(T)$ and $\lambda(T)$



Code_Aster, Salome-Meca course
Material(EDF提供) より一部抜粋
温度依存非線形と
直交異方性両方同時には考慮できない

Natural convection (Fourier law)	ECHANGE	$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = h(t) \cdot (T_{ext} - T)$
Heat exchange between walls	ECHANGE_PAROI	$\lambda_1 \frac{dT_1}{dn_1} = h(T_2 - T_1)$
Normal imposed flux : constant or function of time and space	FLUX_REP	$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = f(t, x)$
Non linear normal flux : function of the temperature Non-linear only	FLUX_NL RAYONNEMENT	$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = f(T)$
Heat source	SOURCE	$s(x, t)$

Salome-mecaによる熱伝導解析

・可能な境界条件と荷重条件 (EDF 社 資料から)

▶ Boundary conditions (Dirichlet)

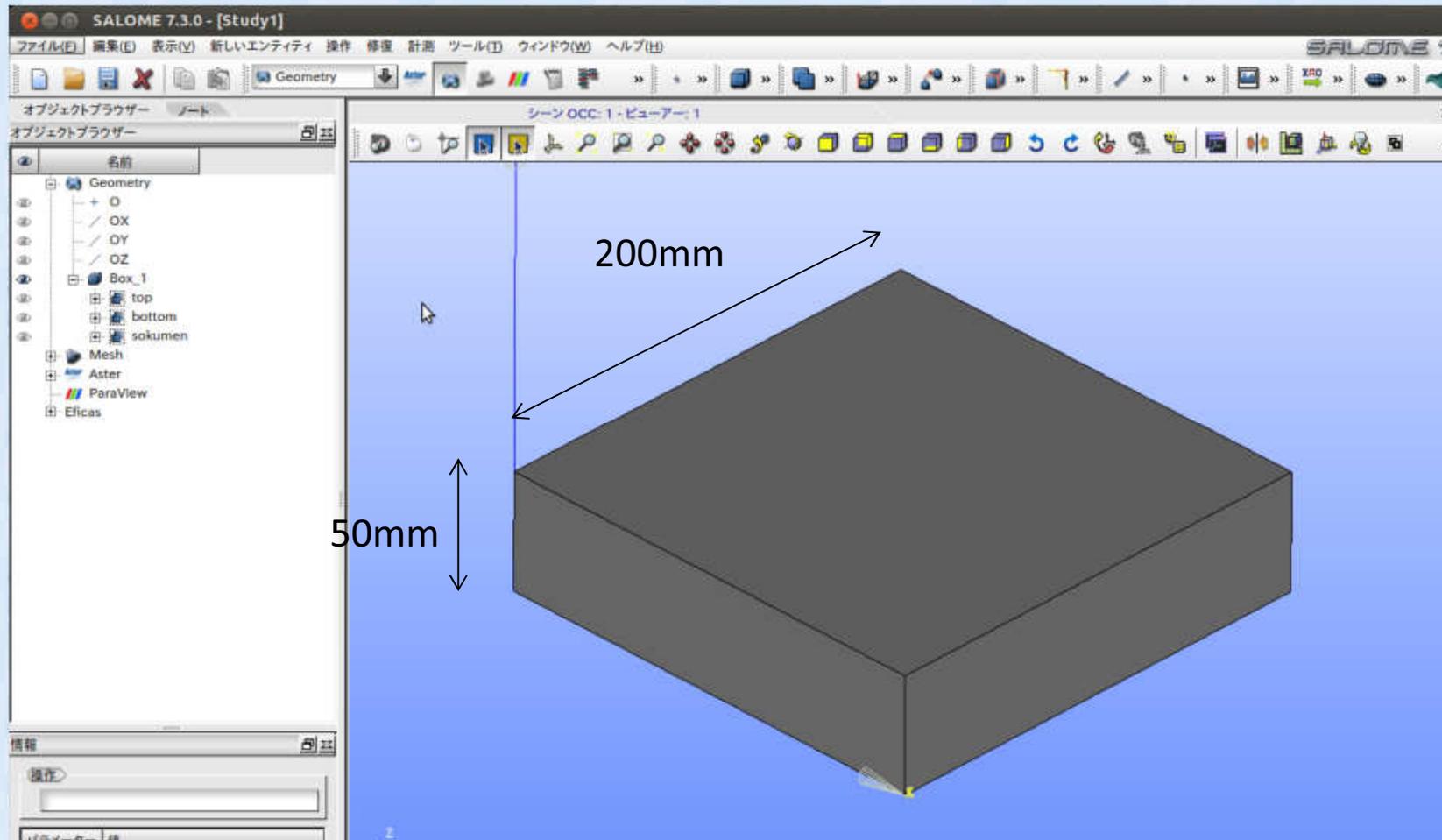
Imposed temperatures function of time and space	TEMP_IMPO
Linear relationships between the nodal temperatures	LIAISON_DDL LIAISON_GROUP LIAISON_MAIL

▶ Loadings (Neumann)

Natural convection (Fourier law)	ECHANGE	$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = h(t) \cdot (T_{ext} - T)$
Heat exchange between walls	ECHANGE_PAROI	$\lambda_1 \frac{dT_1}{dn_1} = h(T_2 - T_1)$
Normal imposed flux : constant or function of time and space	FLUX_REP	$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = f(t, x)$
Non linear normal flux : function of the temperature Non-linear only	FLUX_NL RAYONNEMENT	$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = f(T)$
Heat source	SOURCE	$s(x, t)$

熱伝導簡易テストモデル①

以下の簡易モデルを用いて熱伝導解析設定方法の確認・比較を行う

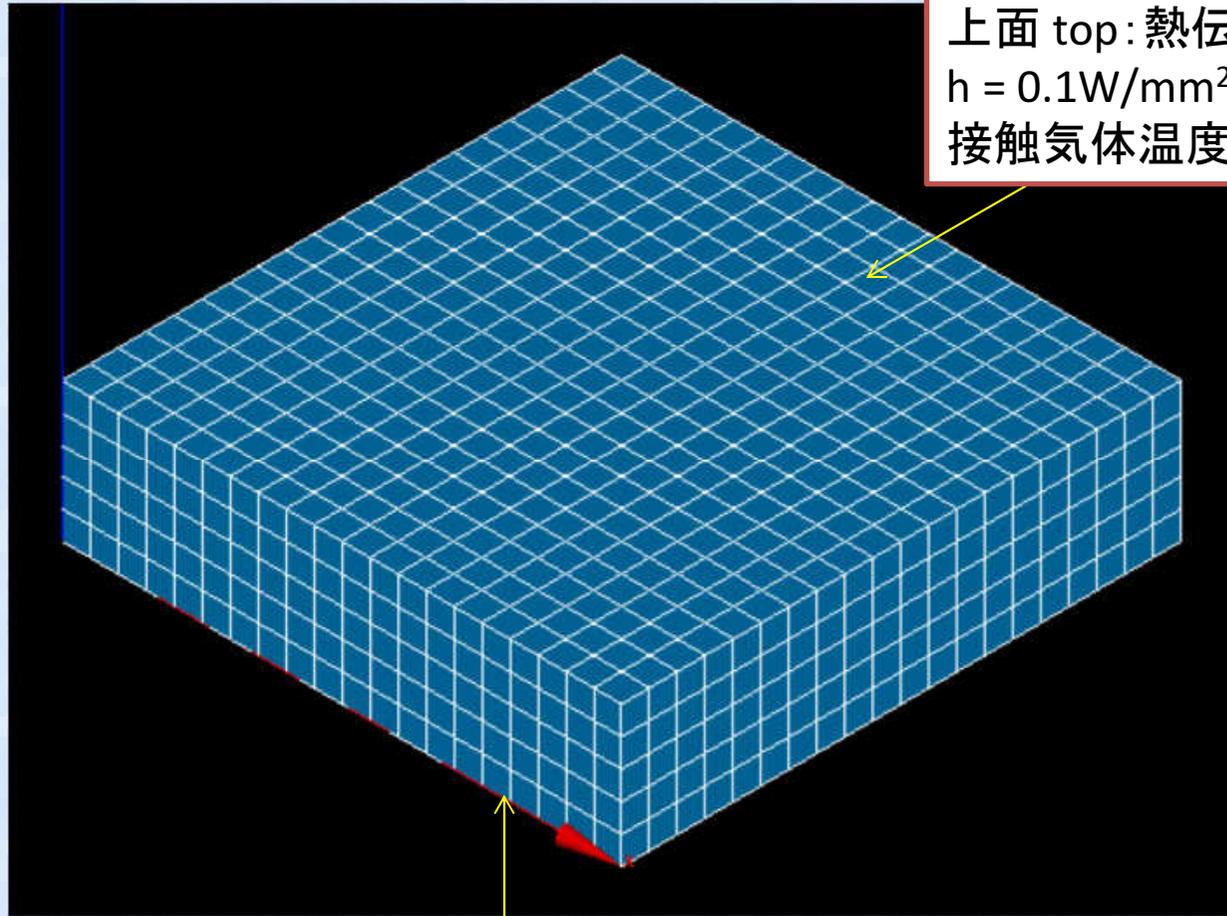


熱伝導簡易テストモデル②

以下の簡易モデルを用いて熱伝導解析設定方法の確認・比較を行う

固体熱伝導率
 $\lambda = 50 \text{ W/mmK}$

側面: 断熱

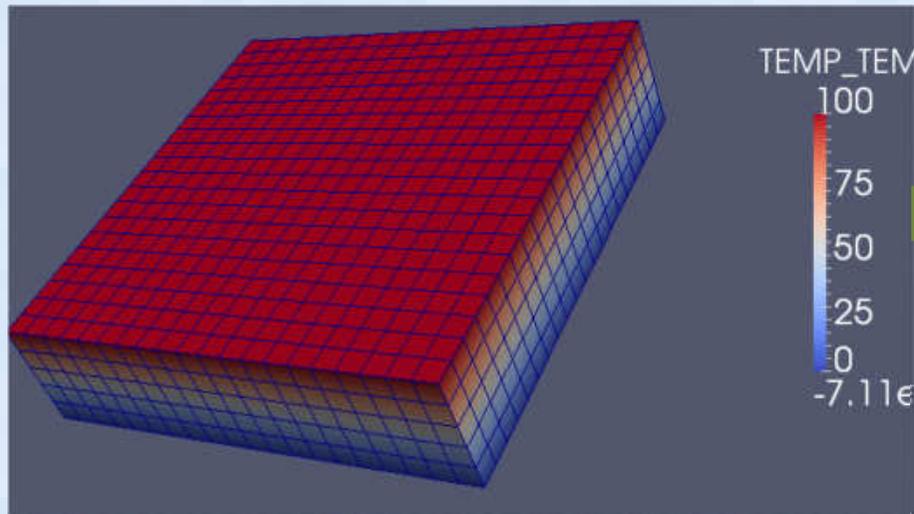


上面 top: 熱伝達境界条件
 $h = 0.1 \text{ W/mm}^2\text{K}$
接触気体温度 = 100°C

下面 bottom: 温度境界条件 0°C

熱伝導簡易テスト解析結果①

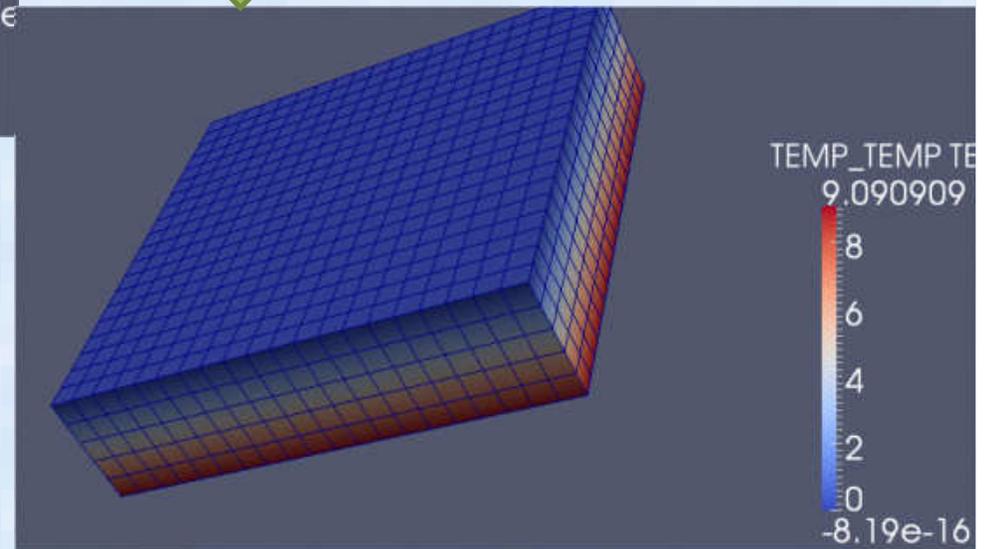
以下の簡易モデルを用いて熱伝導解析設定方法の確認・比較を行う



上面: 温度=100°C
下面: 温度=0°C

Salome-mecaのGUI(Wizard)では境界条件として温度固定境界条件しか与えられないので、とりあえず上面も温度100°Cで設定しておく、とりあえずこの条件で解析した結果が上図になる

Eficasで境界条件を熱伝達境界条件に変更すると以下のように上面の温度が以下のように9.09°Cになる



上面: 温度=9.09°C
下面: 温度=0°C

熱伝導簡易テスト解析結果②

Efficas 設定画面

Commande	Concept/Valeur
test1-2.comm	
DEBUT :	
LIRE_MALLAGE :	MESH
DEFI_MATERIAU :	MATER
AFFE_MODELE :	MODEL
AFFE_MATERIAU :	MATFIELD
AFFE_CHAR_THER :	LOADING
MODELE :	MODEL
TEMP_IMPO :	
ECHANGE :	
GROUP_MA :	bottom
COEF_H :	0.1
TEMP_EXT :	100
THER_LINEAIRE :	TEMP
IMPR_RESU :	
FIN :	

熱伝達境界条件設定箇所

上面: 熱伝達境界条件
 $h = 0.1\text{W}/\text{mm}^2\text{K}$
接触気体温度 = 100°C

```
DEBUT();
MESH=LIRE_MALLAGE(UNITE=20,
  FORMAT='MED',);
MATER=DEFI_MATERIAU(THER=_F(LAMBDA=50.0,));

MODEL=AFFE_MODELE(MALLAGE=MESH,
  AFFE=_F(TOUT='OUI',
    PHENOMENE='THERMIQUE',
    MODELISATION='3D',));
MATFIELD=AFFE_MATERIAU(MALLAGE=MESH,
  AFFE=_F(TOUT='OUI',
    MATER=MATER,));

LOADING=AFFE_CHAR_THER(MODELE=MODEL,
  TEMP_IMPO=_F(GROUP_MA='top',
    TEMP=0.0,),
  ECHANGE=_F(GROUP_MA='bottom',
    COEF_H=0.1,
    TEMP_EXT=100,));
TEMP=THER_LINEAIRE(MODELE=MODEL,
  CHAM_MATER=MATFIELD,
  EXCIT=_F(CHARGE=LOADING,));

IMPR_RESU(FORMAT='MED',
  RESU=_F(RESULTAT=TEMP,));

FIN();
```

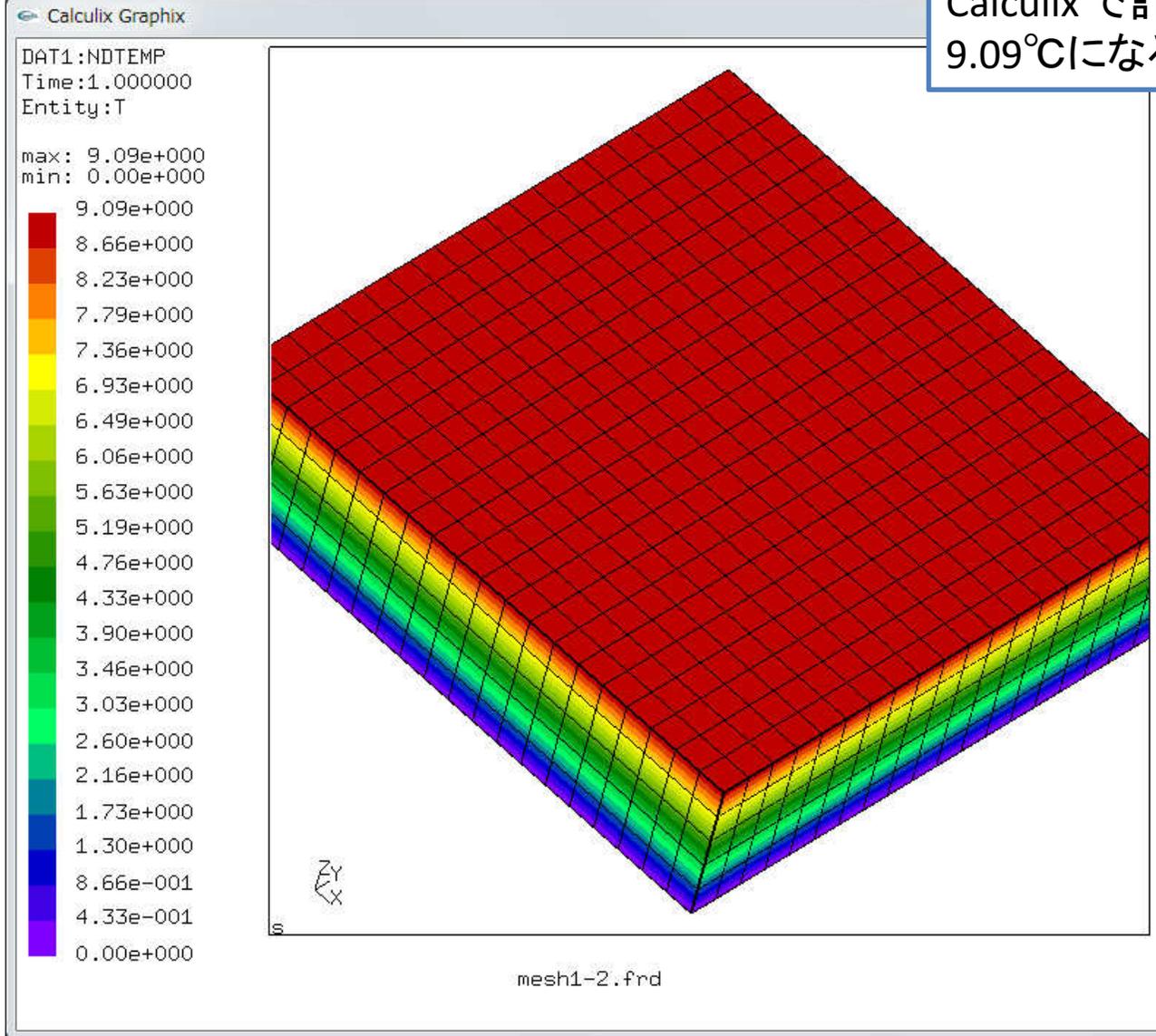
CodeAster コマンドファイル

熱伝導簡易テスト解析結果③

Calculix で計算してもTopの温度が9.09°Cになることが確認できる。

Calculix設定↓

```
*STEP,INC=100
*HEAT TRANSFER,STEADY
STATE1.,1.
*BOUNDARY
bottom,11,11,0.
*FILM
topF6,F6,100.0,0.1
*NODE PRINT,NSET=na11
NT,RFL
*EL PRINT,ELSET=C3D8
HFL
*NODE FILE,NSET=na11
NT,RFL
*EL FILE,ELSET=C3D8
HFL
*END STEP
```

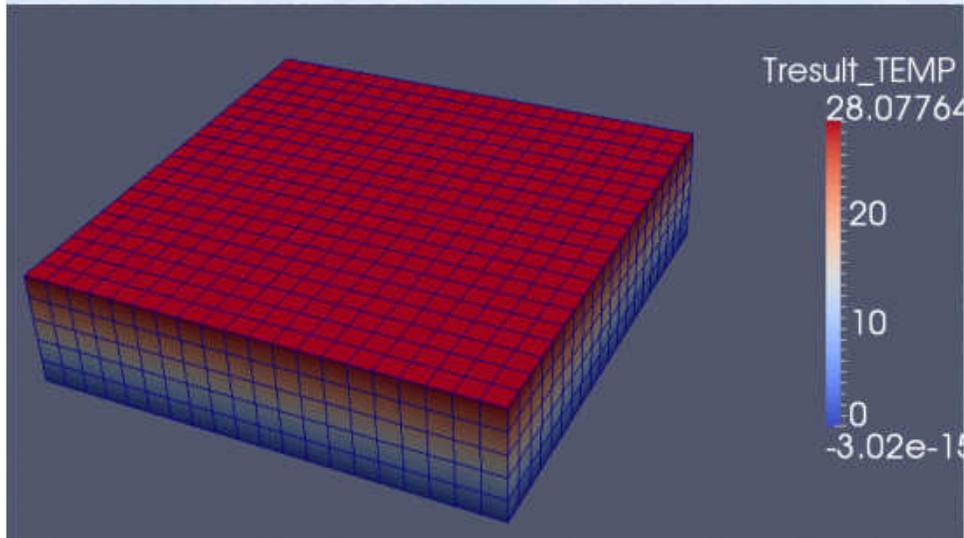


非線形熱伝導解析①

熱伝導 λ の非線形温度依存物性として以下の表の値を与える

温度(°C)	λ (W/mmK)
0	10
50	20
100	50

- ・非線形熱伝導解析はTHER_NLなどで定義



非線形熱伝導解析実施例

非線形解析物性と境界条件によっては収束しないが本問題では特に問題なく計算可能 Topの温度=28.077°C

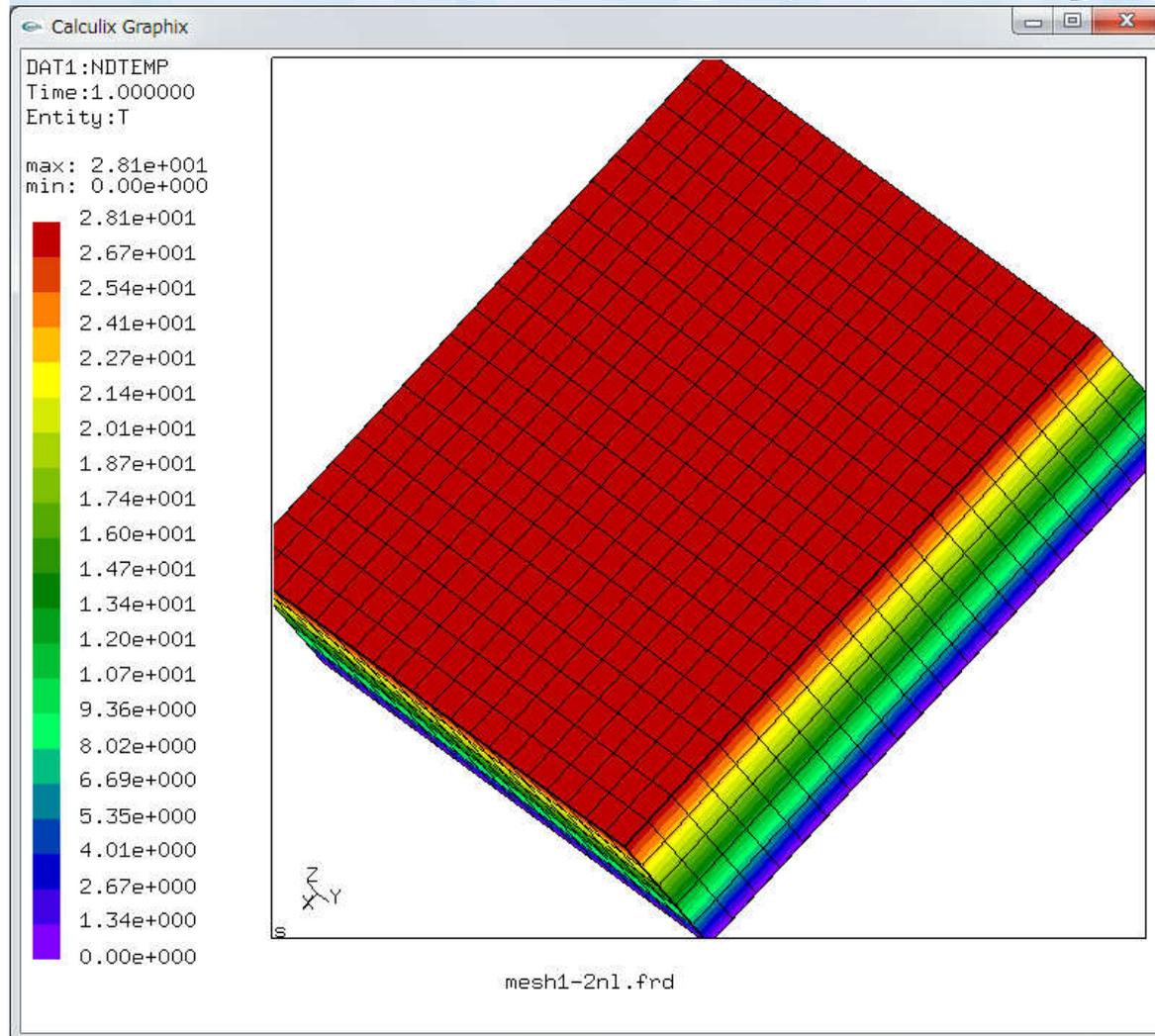
```
DEBUT();
MESH=LIRE_MALLAGE(UNITE=20,
  FORMAT='MED');
la_fo=DEFI_FONCTION(
  NOM_PARA='TEMP',
  NOM_RESU='LAMBDA',
  VALE=(0,10.0,
    50,20.0,
    100,50.0,
  ),
  INTERPOL='LIN',
  PROL_DROITE='LINEAIRE',
  PROL_GAUCHE='LINEAIRE');
MATER=DEFI_MATERIAU(THER_NL=_F(LAMBDA=la_fo,
  BETA=la_fo,));
#MATER=DEFI_MATERIAU(THER=_F(LAMBDA=50.0,));
MODEL=AFFE_MODELE(MALLAGE=MESH,
  AFFE=_F(TOUT='OUI',
    PHENOMENE='THERMIQUE',
    MODELISATION='3D',));
MATFIELD=AFFE_MATERIAU(MALLAGE=MESH,
  AFFE=_F(TOUT='OUI',
    MATER=MATER,));
LOADING=AFFE_CHAR_THER(MODELE=MODEL,
  TEMP_IMPO=_F(GROUP_MA='top',
    TEMP=0.0,),
  ECHANGE=_F(GROUP_MA='bottom',
    COEF_H=0.1,
    TEMP_EXT=100,));
Tresult=THER_NON_LINE(MODELE=MODEL,
  CHAM_MATER=MATFIELD,
  EXCIT=_F(CHARGE=LOADING,),
  CONVERGENCE=_F(ITER_GLOB_MAXI=1000,));
IMPR_RESU(FORMAT='MED',
  RESU=_F(RESULTAT=Tresult,));
FIN();
```

熱伝導率温度依存を定義

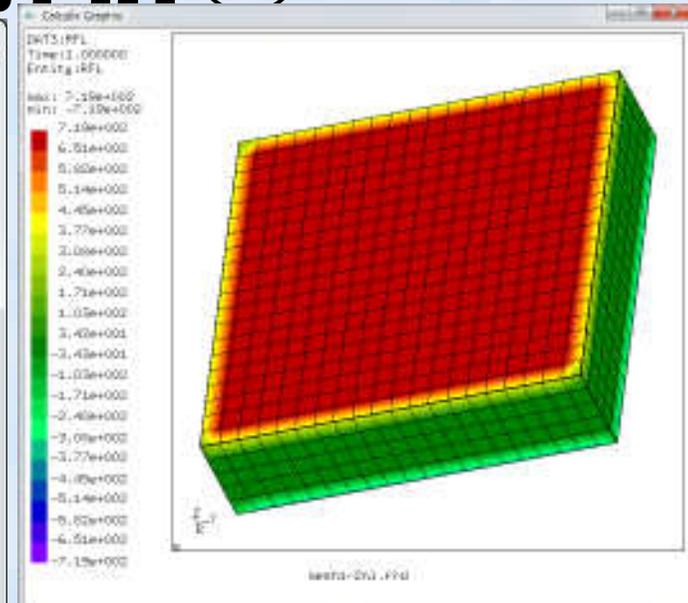
非線形熱伝導物性指定

非線形熱解析指定

非線形熱伝導解析②



Calculix で計算してもTopの温度が
28.1°C(28.079E+01°C)になることが確認できる。



*CONDUCTIVITY

10.0, 0.0

20.0, 50.0

50.0, 100.0

Calculixでは温度依存熱伝導物性を“ $\lambda(T)$, T =温度”で入力するだけで簡単

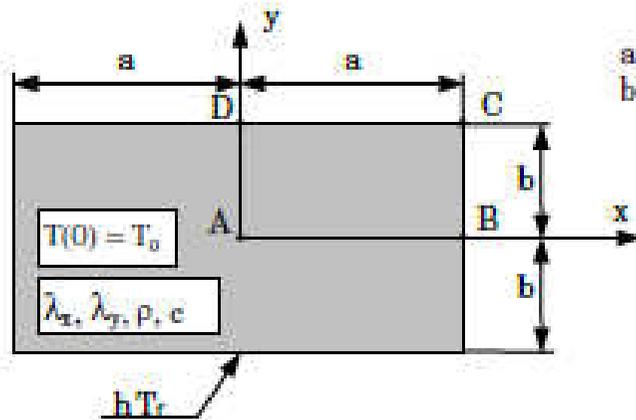
直交異方性熱伝導解析①

・西さんが東京の勉強会@2014.10で報告した検証例題: CodeAster 検証例題に含まれている。Ttlp300が該当の直交異方性熱伝導物性例題: 2次元の平面

Code Aster

Titre : TTLP300 - Transfert thermique dans une barre métal[...]
Responsable : Christophe DURAND

Versio
defau
Date : 01/02/2011 Page : 1/6
Clé : V4.23.300 Révision : 5398



TTLP300 - Transfert thermique dans une barre métallique orthotrope

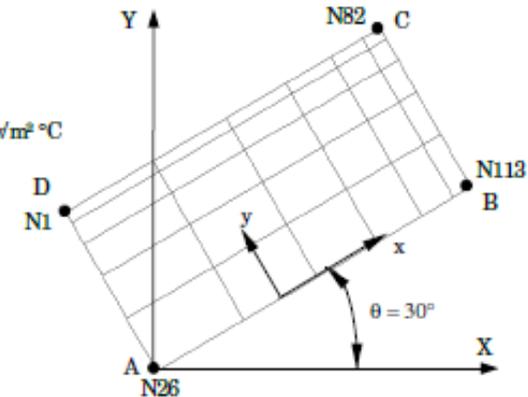
Résumé :

Ce test est issu de la validation indépendante de la version 3 en thermique transitoire linéaire.

PLAN (QUAD8)

Conditions limites

- cotés AB et DA: $\varphi = 0$
- cotés BC et CD: $T_{\text{ext}} = 37.78 \text{ }^\circ\text{C}$
 $h = 1362.71 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$



#

DEFINITION DES CHARGEMENTS ET DU MATERIAU

#

TEMP_EXT=DEFI_CONSTANTE(VALE=37.78E0)

H_CONV=DEFI_CONSTANTE(VALE=1362.71E0)

MATE=DEFI_MATERIAU(THER_ORTH=_F(
LAMBDA_L = 34.614E0,
LAMBDA_T = 6.237E0,
LAMBDA_N = 1.00E0,
RHO_CP = 2.4168E5))

#

熱伝導率直交異方性

直交異方性熱伝導解析②

Calculixでは温度依存非線形物性と同様に、熱伝導物性を直交異方性として定義すれば良い、CodeAster と異なり、温度依存非線形も同時に考慮できる

Following line for TYPE=ORTHO:

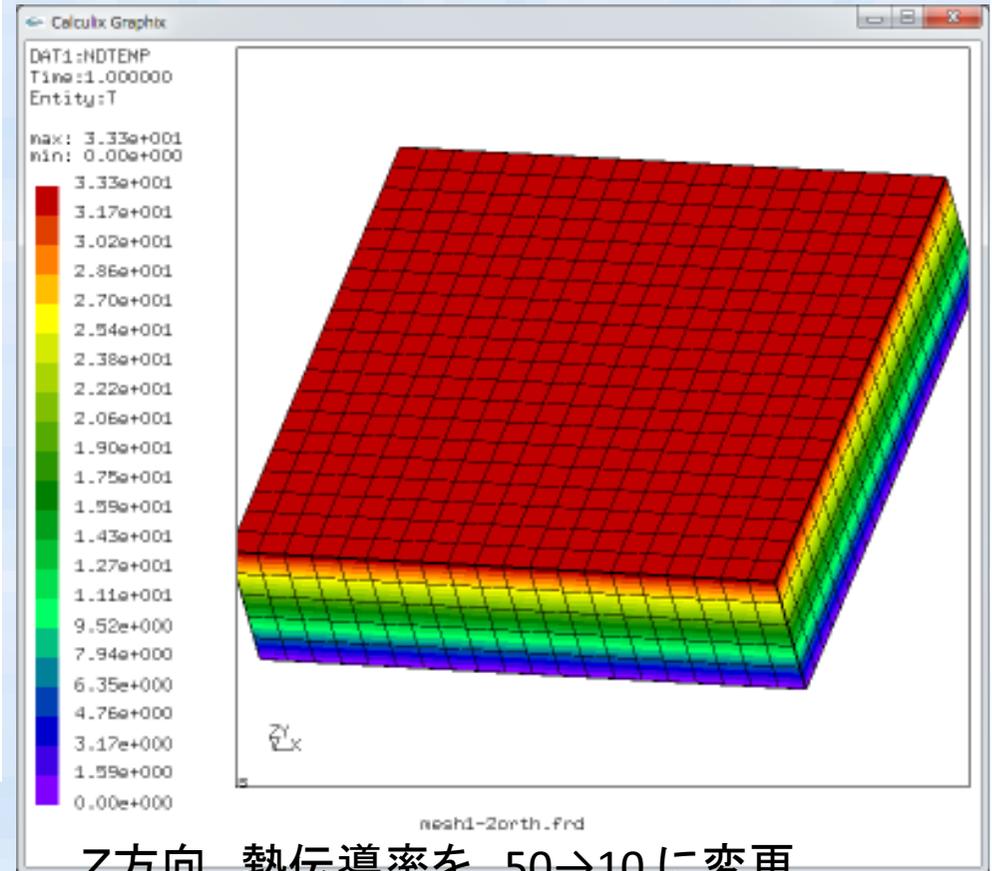
- κ_{11} .
——
- κ_{22} .
——
- κ_{33} .
——
- Temperature.

Repeat this line if needed to define complete temperature dependence.

Following line for TYPE=ANISO:

- κ_{11} .
——
- κ_{22} .
——
- κ_{33} .
——
- κ_{12} .
——
- κ_{13} .
——
- κ_{23} .
——
- Temperature.

```
*material, name=steel  
*CONDUCTIVITY, TYPE=ORTHO  
50.0, 50.0, 10.0
```



Z方向 熱伝導率を 50→10 に変更

まとめ

- **Salome-meca**による熱伝導解析機能を調査。
- 非線形の温度依存熱伝導物性での解析例題を実施し、正常に動作することを確認

OpenCAE勉強会今後の予定

- 12/13(土) OpenCAE 勉強会@富山 ←今ココ
12/13(土) OpenCAE 勉強会@広島
- 12/20 (土) OpenCAE 勉強会@岡山
- 2015 1/10(土) OpenCAE 勉強会@岐阜
- 2015 1/24(土) OpenCAE 勉強会@東京(流体)
- 2015 1/31(土) OpenCAE 勉強会@富山
- 2015 3/21(土) OpenCAE 勉強会@東京(構造)